Przykład 5. Wymiarowanie słupa

Obliczenia	Odniesienie w normie
1	2

Zestawienie przypadków

Przypadek	Moment zginający z uwzględnieniem imperfekcji	Siła osiowa
M_{max}	247,73 kNm	460,49 kN
M_{min}	- 240,13 kNm	367,57 kN
N_{max}	164,40 kNm	534,93 kN

Przypadek M_{max}

$M_{Ed} = 247{,}73\ \text{kNm}$

$N_{Ed} = 460{,}49\ \text{kN}$

Sztywność nominalna

Moduł sprężystości betonu:

$\gamma_{CE} = 1{,}2$

EC 1992-1-1 5.8.6

$$E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}}$$

$$E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}} = \frac{31}{1{,}2} = 25{,}83\ \text{GPa}$$

Moduł sprężystości stali:

$E_s = 200{,}0\ \text{GPa}$

Moment bezwładności przekroju betonu:

$$I_c = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0{,}40 \cdot 0{,}60^3}{12} = 0{,}0072\ \text{m}^4$$

Moment bezwładności zbrojenia:

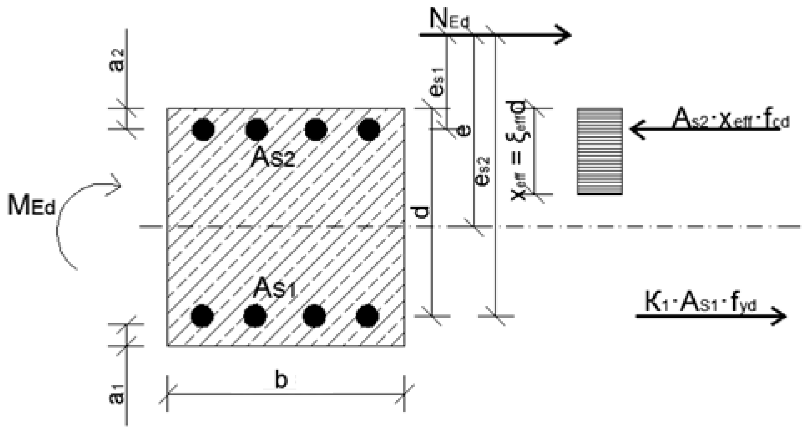
$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot h} = \frac{14{,}07}{40 \cdot 60} = 0{,}0059 = 0{,}59\ \% < \ 1{,}00\ \%$$

$$I_s = \rho \cdot b \ \cdot h \ \cdot \left(\frac{h}{2} - a_1\right)^2 = 0{,}0059 \cdot 0{,}4 \ \cdot 0{,}6 \ \cdot \left(\frac{0{,}60}{2} - 0{,}043\right)^2 = 0{,}00000929\ \text{m}^4$$

Obliczenia	Odniesienie w normie
1	**2**
Współczynniki: $K_s = 1{,}0$ $k_1 = \sqrt{\frac{f_{ck}}{20}} = \sqrt{\frac{25}{20}} = 1{,}12$ $k_2 = n \cdot \frac{\lambda}{170} = 0{,}13 \cdot \frac{60{,}35}{170} = 0{,}05 < 0{,}2$ $K_c = \frac{k_1 \cdot k_2}{1+\varphi_{ef}} = \frac{1{,}12 \cdot 0{,}05}{1+0{,}15} = 0{,}04$ Sztywność nominalna: $EI = K_c \cdot E_{cd} \cdot I_c + K_s \cdot E_s \cdot I_s = 0{,}04 \cdot 25{,}83 \cdot 0{,}0072 + 0 \cdot 200\,000 \cdot 0{,}00000929 = 18{,}59\ MNm^2 = 18595\ kNm^2$ **Współczynnik powiększenia momentu** Współczynnik zależny od rozkładu momentów pierwszego i drugiego rzędu: $c_0 = 9{,}6 \rightarrow$ rozkład paraboliczny momentów zginających I rzędu $\beta = \frac{\Pi^2}{c_0} = \frac{3{,}14^2}{9{,}6} = 1{,}027$ Siła krytyczna ze względu na wyboczenie: $N_B = \frac{\Pi^2 \cdot EI}{{l_0}^2} = \frac{3{,}14^2 \cdot 18595}{10{,}44^2} = 1682{,}07\ kN$ Współczynnik powiększenia momentu: $\alpha = 1 + \frac{\beta}{\frac{N_B}{N_{Ed}} - 1} = 1 + \frac{1{,}027}{\frac{1682{,}07}{460{,}49} - 1} = 1{,}39$ Siły wewnętrzne po uwzględnieniu efektów II rzędu: $M_{Ed} = \alpha \cdot M_{Ed} = 1{,}39 \cdot 247{,}73 = 343{,}64\ kNm$ $N_{Ed} = 460{,}49\ kN$	EC 1992-1-1 5.8.7.3

Obliczenia	Odniesienie w normie
1	2

Wymiarowanie na ściskanie mimośrodowe



$A_{s1} \neq A_{s2}$

M_{Ed} = 343,64 kNm

N_{Ed} = 460,49 kN

A_{s1} = 10,05 cm^2

A_{s2} = 4,02 cm^2

$e_{tot} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{343,64}{460,49}$ = 0,75 m

$e_{s1}= e_{tot} - \frac{d}{2} - a_2$ = 0,75 - $\frac{0,557}{2}$ - 0,043 = 0,98 m

$e_{s2}= e_{s1} - (d - a_2)$= 0,98 - (0,557 - 0,043) = 0,47 m

e_{s1}= 0,98 m > h = 0,60 m → słup ściskany z dużym mimośrodem

Ustalenie zasięgu strefy ściskanej:

$$\xi_{eff} = \frac{N_{Ed} - (A_{s1} - A_{s2}) \cdot f_{yd}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{460,49 - (0,001005 - 0,000402) \cdot 435 \cdot 1000}{0,4 \cdot 0,557 \cdot 16,67 \cdot 1000} = 0,0534$$

Przyjęto $\xi_{eff} = \xi_{eff,lim} = 0,50$, ponieważ $\xi_{eff} < \xi_{eff,lim}$

$\chi_{eff} = \chi_{ef,lim} = \xi_{ef,lim} \cdot d = 0,50 \cdot 0557 = 0,279\ m$

Obliczenie pola zbrojenia w strefie ściskanej:

$$\sum M_{AS1} = 0 \rightarrow f_{yd} \cdot A_{S2} \cdot (d - a_2) + f_{cd} \cdot b \cdot \chi_{eff,lim} \cdot \left(d - 0,5 \cdot \chi_{eff,lim}\right) = N_{Ed} \cdot e_{S1}$$

Obliczenia	**Odniesienie w normie**
1	**2**

$$A_{S2} = \frac{N_{Ed} \cdot e_{S1} - f_{cd} \cdot b \cdot \chi_{eff,lim} \cdot \left(d - 0{,}5 \cdot \chi_{eff,lim}\right)}{f_{yd} \cdot (d - a_2)}$$

$$A_{S2} = \frac{460{,}49 \cdot 0{,}98 - 16{,}67 \cdot 1000 \cdot 0{,}40 \cdot 0{,}279 \cdot (0{,}557 - 0{,}5 \cdot 0{,}279)}{435 \cdot 1000 \cdot (0{,}557 - 0{,}043)}$$
$$= -0{,}001448\, m^2 = -14{,}48\, cm^2 < 0$$

Przyjęto 2 Φ16 o $A_{s2} = 4{,}02$ cm^2 > $A_{smin} = 3{,}80$ cm^2

Ustalenie zasięgu strefy ściskanej:

$$\sum M_{AS1} = 0 \rightarrow f_{yd} \cdot A_{S2} \cdot (d - a_2) + f_{cd} \cdot b \cdot \chi_{eff} \cdot \left(d - 0{,}5 \cdot \chi_{eff}\right) = N_{Ed} \cdot e_{S1}$$

$$f_{cd} \cdot b \cdot \chi_{eff} \cdot \left(d - 0{,}5 \cdot \chi_{eff}\right) = N_{Ed} \cdot e_{S1} - f_{yd} \cdot A_{S2} \cdot (d - a_2)$$

$$16{,}67 \cdot 1000 \cdot 0{,}40 \cdot \chi_{eff} \cdot \left(0{,}557 - 0{,}5 \cdot \chi_{eff}\right)$$
$$= 460{,}49 \cdot 0{,}98 - 435 \cdot 1000 \cdot 0{,}000402 \cdot (0{,}557 - 0{,}043)$$

$$-3333{,}33\chi_{eff}{}^2 + 3713{,}33\chi_{eff} - 362{,}25 = 0$$

$$\Delta = b^2 - 4 \cdot a \cdot c = 3713{,}33^2 - 4 \cdot (-3333{,}33) \cdot (-362{,}25) = 8959978$$

$$\sqrt{\Delta} = \sqrt{8958878} = 2993{,}14$$

$$x_{eff_1} = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2\,a} = \frac{-3713{,}33 - 2993{,}14}{2 \cdot (-3333{,}33)} = 1{,}00 > h = 0{,}50\ m$$

$$x_{eff_2} = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2\,a} = \frac{-3713{,}33 + 2993{,}14}{2 \cdot (-3333{,}33)} = 0{,}11\ m$$

Przyjęto $x_{eff} = x_{eff_2} = 0{,}11$ m

Obliczenie pola zbrojenia w strefie rozciąganej:

$$\sum F_x = 0 \quad \rightarrow \quad N_{Ed} = f_{cd} \cdot b_w \cdot x_{eff} + f_{yd} \cdot A_{s2} - \kappa_s \cdot f_{yd} \cdot A_{s1}$$

$$A_{s1} = \frac{-N_{Ed} + f_{cd} \cdot b_w \cdot x_{ef} + f_{yd} \cdot A_{s2}}{\kappa_s \cdot f_{yd}}$$

$$A_{S1} = \frac{-460{,}49 + 16{,}66 \cdot 1000 \cdot 0{,}40 \cdot 0{,}11 + 435 \cdot 1000 \cdot 0{,}000402}{435 \cdot 1000}$$
$$= 9{,}99\, cm^2$$

Przyjęto 5 Φ16 o $A_{s1} = 10{,}05$ cm^2 > $A_{smin} = 3{,}80$ cm^2

Obliczenia	Odniesienie w normie
1	**2**
Sprawdzenie poprawności przyjętego stopnia zbrojenia: $\rho_{obl} = \frac{A_{s1} + A_{s2}}{b \cdot h} = \frac{10,05 + 4,02}{0,40 \cdot 0,60} = 0,0075$ $\Delta\rho = \rho - \rho_{obl} = 0,0069 - 0,0069 = 0,0000$ $\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{0,0000}{0,0069} = 0,00 < 0,10$ prawidłowo przyjeto stopień zbrojenia słupa **Przypadek M_{min}** $M_{Ed} = 240,13$ kNm $N_{Ed} = 367,57$ kN **Sztywność nominalna** Moduł sprężystości betonu: $\gamma_{CE} = 1,2$ $E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}}$ $E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}} = \frac{31}{1,2} = 25,83$ GPa Moduł sprężystości stali: $E_s = 200,0$ GPa Moment bezwładności przekroju betonu: $I_c = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,40 \cdot 0,60^3}{12} = 0,0072\ m^4$ Moment bezwładności zbrojenia: $\rho = \frac{A_s}{b \cdot h} = \frac{14,07}{40 \cdot 60} = 0,0059 = 0,59\ \% >\ 1,00\ \%$ $I_s = \rho \cdot b \cdot h \cdot (\frac{h}{2} - a_1)^2 = 0,0059 \cdot 0,4 \cdot 0,6 \cdot (\frac{0,60}{2} - 0,043)^2 = 0,00000929\ m^4$ Współczynniki: $K_s = 1,0$ $k_1 = \sqrt{\frac{f_{ck}}{20}} = \sqrt{\frac{25}{20}} = 1,12$	

Obliczenia	Odniesienie w normie
1	2

$k_2 = n \cdot \frac{\lambda}{170} = 0{,}13 \cdot \frac{60{,}35}{170} = 0{,}05 < 0{,}2$

$$K_c = \frac{k_1 \cdot k_2}{1 + \varphi_{ef}} = \frac{1{,}12 \cdot 0{,}05}{1 + 0{,}15} = 0{,}04$$

Sztywność nominalna:

$\mathrm{EI} = \mathrm{K_c} \cdot \mathrm{E_{cd}} \cdot \mathrm{I_c} + \mathrm{K_s} \cdot \mathrm{E_s} \cdot \mathrm{I_s} = 0{,}04 \cdot 25{,}83 \cdot 0{,}0072 + 0 \cdot 200\,000 \cdot 0{,}00000929$ $= 18{,}59\ \mathrm{MNm^2} = 18595\ \mathrm{kNm^2}$

Współczynnik powiększenia momentu

Współczynnik zależny od rozkładu momentów pierwszego i drugiego rzędu:

$c_0 = 9{,}6$ → rozkład paraboliczny momentów zginających I rzędu

$\beta = \frac{\Pi^2}{c_0} = \frac{3{,}14^2}{9{,}6} = 1{,}027$

Siła krytyczna ze względu na wyboczenie:

$N_B = \frac{\Pi^2 \cdot EI}{{l_0}^2} = \frac{3{,}14^2 \cdot 18595}{10{,}44^2} = 1682{,}07\ \mathrm{kN}$

Współczynnik powiększenia momentu:

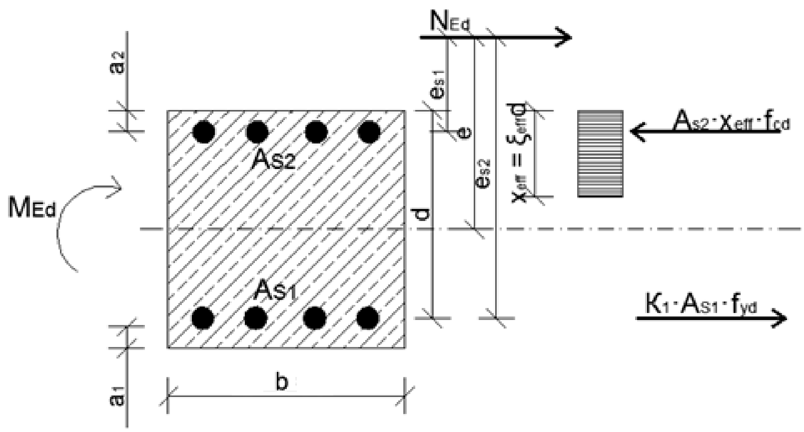
$\alpha = 1 + \frac{\beta}{\frac{N_B}{N_{Ed}} - 1} = 1 + \frac{1{,}027}{\frac{1682{,}07}{367{,}57} - 1} = 1{,}29$

Siły wewnętrzne po uwzględnieniu efektów II rzędu:

$M_{Ed} = \alpha \cdot M_{Ed} = 1{,}29 \cdot 240{,}13 = 309{,}09\ \mathrm{kNm}$

$\mathrm{N_{Ed}} = 367{,}57\ \mathrm{kN}$

Wymiarowanie na ściskanie mimośrodowe



Obliczenia	**Odniesienie w normie**
1	**2**
$A_{s1} \neq A_{s2}$ M_{Ed} = 309,09 kNm N_{Ed} = 367,57 kN A_{s1} = 12,06 cm^2 A_{s2} = 4,02 cm^2 $e_{tot} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{309{,}09}{367{,}57}$ = 0,84 m $e_{s1} = e_{tot} - \frac{d}{s} - a_2$ = 0,84 - $\frac{0{,}557}{s}$ - 0,043 = 1,08 m $e_{s2} = e_{s1} - (d - a_2)$ = 1,08 - (0,557 - 0,043) = 0,56 m e_{s1} = 1,08 m > h = 0,60 m → słup ściskany z dużym mimośrodem Ustalenie zasięgu strefy ściskanej: $$\xi_{eff} = \frac{N_{Ed} - (A_{s1} - A_{s2}) \cdot f_{yd}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{367{,}57 - (0{,}001005 - 0{,}000402) \cdot 435 \cdot 1000}{0{,}4 \cdot 0{,}557 \cdot 16{,}67 \cdot 1000} = 0{,}0284$$ Przyjęto $\xi_{eff} = \xi_{eff,lim} = 0{,}50$, ponieważ $\xi_{eff} < \xi_{eff,lim}$ $\chi_{eff} = \chi_{ef,lim} = \xi_{ef,lim} \cdot d = 0{,}50 \cdot 0557 = 0{,}279\ m$ Obliczenie pola zbrojenia w strefie ściskanej: $$\sum M_{AS1} = 0 \rightarrow f_{yd} \cdot A_{S2} \cdot (d - a_2) + f_{cd} \cdot b \cdot \chi_{eff,lim} \cdot \left(d - 0{,}5 \cdot \chi_{eff,lim}\right) = N_{Ed} \cdot e_{S1}$$ $$A_{S2} = \frac{N_{Ed} \cdot e_{S1} - f_{cd} \cdot b \cdot \chi_{eff,lim} \cdot \left(d - 0{,}5 \cdot \chi_{eff,lim}\right)}{f_{yd} \cdot (d - a_2)}$$ $$A_{S2} = \frac{367{,}57 \cdot 1{,}08 - 16{,}67 \cdot 1000 \cdot 0{,}40 \cdot 0{,}279 \cdot (0{,}557 - 0{,}5 \cdot 0{,}279)}{435 \cdot 1000 \cdot (0{,}557 - 0{,}043)} = -0{,}001700\ m^2 = -17{,}00\ cm^2 < 0$$ Przyjęto 2 Φ16 o A_{s2} = 4,02 cm^2 > A_{smin} = 3,80 cm^2 Ustalenie zasięgu strefy ściskanej: $$\sum M_{AS1} = 0 \rightarrow f_{yd} \cdot A_{S2} \cdot (d - a_2) + f_{cd} \cdot b \cdot \chi_{eff} \cdot \left(d - 0{,}5 \cdot \chi_{eff}\right) = N_{Ed} \cdot e_{S1}$$	

Obliczenia	Odniesienie w normie
1	**2**

$$f_{cd} \cdot b \cdot \chi_{eff} \cdot (d - 0{,}5 \cdot \chi_{eff}) = N_{Ed} \cdot e_{S1} - f_{yd} \cdot A_{S2} \cdot (d - a_2)$$

$$16{,}67 \cdot 1000 \cdot 0{,}40 \cdot \chi_{eff} \cdot (0{,}557 - 0{,}5 \cdot \chi_{eff}) = 367{,}46 \cdot 1{,}08 - 435 \cdot 1000 \cdot 0{,}000402 \cdot (0{,}557 - 0{,}043)$$

$$-3333{,}33\chi_{eff}^{\ 2} + 3713{,}33\chi_{eff} - 305{,}82 = 0$$

$$\Delta = b^2 - 4 \cdot a \cdot c = 3713{,}33^2 - 4 \cdot (-3333{,}33) \cdot (-305{,}82) = 9711281$$

$$\sqrt{\Delta} = \sqrt{9711281} = 3116{,}29$$

$$x_{eff_1} = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2\,a} = \frac{-3713{,}33 - 3116{,}29}{2 \cdot (-3333{,}33)} = 1{,}02 > h = 0{,}50 \text{ m}$$

$$x_{eff_2} = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2\,a} = \frac{-3713{,}33 + 3116{,}29}{2 \cdot (-3333{,}33)} = 0{,}09 \text{ m}$$

Przyjęto $x_{eff} = x_{eff_2} = 0{,}09$ m

Obliczenie pola zbrojenia w strefie rozciąganej:

$$\sum F_x = 0 \quad \rightarrow \quad N_{Ed} = f_{cd} \cdot b_w \cdot x_{eff} + f_{yd} \cdot A_{s2} - \kappa_s \cdot f_{yd} \cdot A_{s1}$$

$$A_{s1} = \frac{-N_{Ed} + f_{cd} \cdot b_w \cdot x_{ef} + f_{yd} \cdot A_{s2}}{\kappa_s \cdot f_{yd}}$$

$$A_{S1} = \frac{-367{,}57 + 16{,}66 \cdot 1000 \cdot 0{,}40 \cdot 0{,}09 + 435 \cdot 1000 \cdot 0{,}000402}{435 \cdot 1000} = 9{,}29\ cm^2$$

Przyjęto 5 Φ16 o $A_{s1} = 10{,}05$ cm^2 > $A_{smin} = 3{,}80$ cm^2

Sprawdzenie poprawności przyjętego stopnia zbrojenia:

$$\rho_{obl} = \frac{A_{s1} + A_{s2}}{b \cdot h} = \frac{10{,}05 + 4{,}02}{0{,}40 \cdot 0{,}60} = 0{,}0059$$

$$\Delta\rho = \rho - \rho_{obl} = 0{,}0059 - 0{,}0059 = 0{,}0000$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{0{,}0000}{0{,}0059} = 0{,}00 < 0{,}10 \text{ prawidłowo przyjeto stopień zbrojenia słupa}$$

Przypadek N_{max}

$M_{Ed} = 164{,}40$ kNm

$N_{Ed} = 534{,}93$ kN

Obliczenia	Odniesienie w normie
1	2
Sztywność nominalna Moduł sprężystości betonu: $\gamma_{CE} = 1{,}2$ $E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}}$ $E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}} = \frac{31}{1{,}2} = 25{,}83\ \text{GPa}$ Moduł sprężystości stali: $E_s = 200{,}0\ \text{GPa}$ Moment bezwładności przekroju betonu: $I_c = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0{,}40 \cdot 0{,}60^3}{12} = 0{,}0072\ \text{m}^4$ Moment bezwładności zbrojenia: $\rho = \frac{A_s}{b \cdot h} = \frac{12{,}06}{40 \cdot 60} = 0{,}0050 = 0{,}50\ \% > \ 1{,}00\ \%$ $I_s = \rho \cdot b\ \cdot h\ \cdot (\frac{h}{2} - a_1)^2 = 0{,}0050 \cdot 0{,}4\ \cdot 0{,}6\ \cdot (\frac{0{,}60}{2} - 0{,}043)^2$ $= 0{,}00000797\ \text{m}^4$ Współczynniki: $K_s = 1{,}0$ $k_1 = \sqrt{\frac{f_{ck}}{20}} = \sqrt{\frac{25}{20}} = 1{,}12$ $k_2 = n\ \cdot\ \frac{\lambda}{170} = 0{,}13\ \cdot\ \frac{60{,}35}{170} = 0{,}05 < 0{,}2$ $K_c = \frac{k_1\ \cdot\ k_2}{1 + \varphi_{ef}} = \frac{1{,}12\ \cdot 0{,}05}{1 + 0{,}15} = 0{,}04$ Sztywność nominalna: $EI = K_c \cdot E_{cd} \cdot I_c + K_s \cdot E_s \cdot I_s\ \ = 0{,}04 \cdot 25{,}83 \cdot 0{,}0072 + 0 \cdot 200\ 000 \cdot$ $0{,}00000797 = 15{,}94\ \text{MNm}^2\ =15939\ \text{kNm}^2$ **Współczynnik powiększenia momentu** Współczynnik zależny od rozkładu momentów pierwszego i drugiego rzędu: $c_0 = 9{,}6 \rightarrow$ rozkład paraboliczny momentów zginających I rzędu	

Obliczenia	Odniesienie w normie
1	**2**

$\beta = \frac{\Pi^2}{c_0} = \frac{3{,}14^2}{9{,}6} = 1{,}027$

Siła krytyczna ze względu na wyboczenie:

$N_B = \frac{\Pi^2 \cdot EI}{{l_0}^2} = \frac{3{,}14^2 \cdot 15939}{10{,}44^2} = 1441{,}88$ kN

Współczynnik powiększenia momentu:

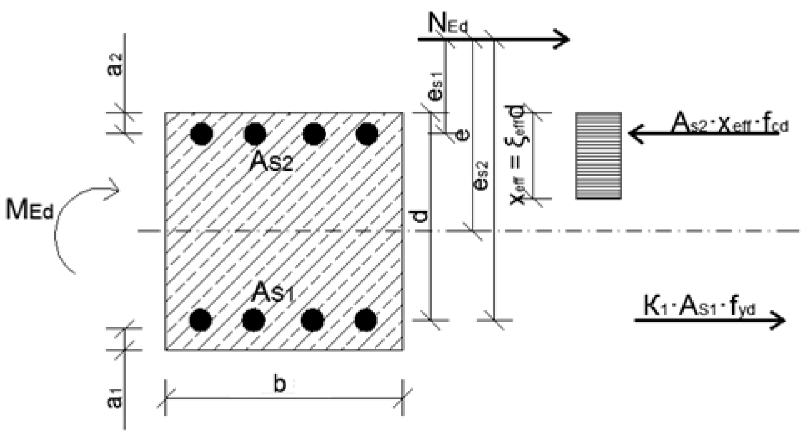
$\alpha = 1 + \frac{\beta}{\frac{N_B}{N_{Ed}} - 1} = 1 + \frac{1{,}027}{\frac{1441{,}88}{534{,}93} - 1} = 1{,}61$

Siły wewnętrzne po uwzględnieniu efektów II rzędu:

$M_{Ed} = \alpha \cdot M_{Ed} = 1{,}61 \cdot 164{,}40 = 263{,}99$ kNm

$N_{Ed} = 534{,}93$ kN

Wymiarowanie na ściskanie mimośrodowe



$A_{s1} \neq A_{s2}$

$M_{Ed} = 263{,}99$ kNm

$N_{Ed} = 534{,}93$ kN

$A_{s1} = 8{,}04\ cm^2$

$A_{s2} = 4{,}02\ cm^2$

$e_{tot} = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{263{,}99}{534{,}93} = 0{,}49$ m

$e_{s1} = e_{tot} - \frac{d}{s} - a_2 = 0{,}49 - \frac{0{,}557}{s} - 0{,}043 = 0{,}73$ m

$e_{s2} = e_{tot} - (d - a_2) = 0{,}73 - (0{,}557 - 0{,}043) = 0{,}21$ m

$e_{s1} = 0{,}73$ m > h = 0,60 m → słup ściskany z dużym mimośrodem

Obliczenia	Odniesienie w normie
1	2
Ustalenie zasięgu strefy ściskanej: $$\xi_{eff} = \frac{N_{Ed} - (A_{s1} - A_{s2}) \cdot f_{yd}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{534{,}93 - (0{,}000804 - 0{,}000402) \cdot 435 \cdot 1000}{0{,}4 \cdot 0{,}557 \cdot 16{,}67 \cdot 1000} = 0{,}097$$ Przyjęto $\xi_{eff} = \xi_{eff,lim} = 0{,}50$, ponieważ $\xi_{eff} < \xi_{eff,lim}$ $$\chi_{eff} = \chi_{ef,lim} = \xi_{ef,lim} \cdot d = 0{,}50 \cdot 0557 = 0{,}279\ m$$ Obliczenie pola zbrojenia w strefie ściskanej: $$\sum M_{AS1} = 0 \rightarrow f_{yd} \cdot A_{S2} \cdot (d - a_2) + f_{cd} \cdot b \cdot \chi_{eff,lim} \cdot \left(d - 0{,}5 \cdot \chi_{eff,lim}\right) = N_{Ed} \cdot e_{S1}$$ $$A_{S2} = \frac{N_{Ed} \cdot e_{S1} - f_{cd} \cdot b \cdot \chi_{eff,lim} \cdot \left(d - 0{,}5 \cdot \chi_{eff,lim}\right)}{f_{yd} \cdot (d - a_2)}$$ $$A_{S2} = \frac{534{,}93 \cdot 0{,}73 - 16{,}67 \cdot 1000 \cdot 0{,}40 \cdot 0{,}279 \cdot (0{,}557 - 0{,}5 \cdot 0{,}279)}{435 \cdot 1000 \cdot (0{,}557 - 0{,}043)} = -0{,}001726\ m^2 = -17{,}26\ cm^2 < 0$$ Przyjęto 2 Φ16 o $A_{s2} = 4{,}02\ cm^2 > A_{smin} = 3{,}80\ cm^2$ Ustalenie zasięgu strefy ściskanej: $$\sum M_{AS1} = 0 \rightarrow f_{yd} \cdot A_{S2} \cdot (d - a_2) + f_{cd} \cdot b \cdot \chi_{eff} \cdot \left(d - 0{,}5 \cdot \chi_{eff}\right) = N_{Ed} \cdot e_{S1}$$ $$f_{cd} \cdot b \cdot \chi_{eff} \cdot \left(d - 0{,}5 \cdot \chi_{eff}\right) = N_{Ed} \cdot e_{S1} - f_{yd} \cdot A_{S2} \cdot (d - a_2)$$ $$16{,}67 \cdot 1000 \cdot 0{,}40 \cdot \chi_{eff} \cdot \left(0{,}447 - 0{,}5 \cdot \chi_{eff}\right) = 534{,}93 \cdot 0{,}73 - 435 \cdot 1000 \cdot 0{,}000402 \cdot (0{,}557 - 0{,}043)$$ $$-3333{,}33{\chi_{eff}}^2 + 3713{,}33\chi_{eff} - 300{,}12 = 0$$ $$\Delta = b^2 - 4 \cdot a \cdot c = 3713{,}33^2 - 4 \cdot (-3333{,}33) \cdot (-300{,}12) = 9787179$$ $$\sqrt{\Delta} = \sqrt{9787179} = 3128{,}45$$ $$x_{eff_1} = \frac{-b - \sqrt{\Delta}}{2\,a} = \frac{-422{,}24 - 3128{,}45}{2 \cdot (-3333{,}33)} = 1{,}03 > h = 0{,}50\ m$$	

Obliczenia	Odniesienie w normie
1	2

$$x_{eff_2} = \frac{-b + \sqrt{\Delta}}{2\,a} = \frac{-422{,}24 + 3128{,}45}{2 \cdot (-3333{,}33)} = 0{,}09\text{ m}$$

Przyjęto $x_{eff} = x_{eff_2} = 0{,}09$ m

Obliczenie pola zbrojenia w strefie rozciąganej:

$$\sum F_x = 0 \quad \rightarrow \quad N_{Ed} = f_{cd} \cdot b_w \cdot x_{eff} + f_{yd} \cdot A_{s2} - \kappa_s \cdot f_{yd} \cdot A_{s1}$$

$$A_{s1} = \frac{-N_{Ed} + f_{cd} \cdot b_w \cdot x_{ef} + f_{yd} \cdot A_{s2}}{\kappa_s \cdot f_{yd}}$$

$$A_{S1} = \frac{-534{,}93 + 16{,}66 \cdot 1000 \cdot 0{,}40 \cdot 0{,}09 + 435 \cdot 1000 \cdot 0{,}000402}{435 \cdot 1000} = 5{,}17\ cm^2$$

Przyjęto 4 Φ16 o A_{s1} = 8,04 cm^2 > A_{smin} = 3,80 cm^2

Sprawdzenie poprawności przyjętego stopnia zbrojenia:

$$\rho_{obl} = \frac{A_{s1} + A_{s2}}{b \cdot h} = \frac{8{,}04 + 4{,}02}{0{,}40 \cdot 0{,}60} = 0{,}0050$$

$$\Delta\rho = \rho - \rho_{obl} = 0{,}0050 - 0{,}0050 = 0{,}0000$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{0{,}0000}{0{,}0050} = 0{,}00 > 0{,}10 \text{ prawidłowo przyjeto stopień zbrojenia słupa}$$

Podsumowanie

Przypadek	Zbrojenie po lewej stronie	Zbrojenie po prawej stronie
M_{max}	5 Φ16 o A_s = 10,05 cm^2	2 Φ16 o A_s = 4,02 cm^2
M_{min}	2 Φ16 o A_s = 4,02 cm^2	5 Φ16 o A_s = 10,05 cm^2
N_{max}	4 Φ16 o A_s = 8,04 cm^2	2 Φ16 o A_s = 4,02 cm^2
Zbrojenie końcowe	**5 Φ16 o A_s = 10,05 cm^2**	**5 Φ16 o A_s = 10,05 cm^2**

Obliczenia	**Odniesienie w normie**
1	**2**
Wymiarowanie na ścinanie Przyjęto strzemiona dwucięte z prętów ϕ 8 o A_s = 1,0 cm^2 Minimalna średnica: $\phi_{s,min} = min \begin{Bmatrix} 6\ mm \\ \frac{\phi}{4} \end{Bmatrix} = min \begin{Bmatrix} 6\ mm \\ \frac{16}{4} \end{Bmatrix} = \text{min} \begin{Bmatrix} 6\ mm \\ 4\ mm \end{Bmatrix} = 4\text{ mm}$ $\phi_{s,min}$ == 4 mm > ϕ_s = 8 mm warunek spełniony Maksymalny rozstaw zbrojenia: $s_{cl,tmax} = \text{min} \begin{Bmatrix} 20\phi \\ b \\ 400\ mm \end{Bmatrix} = min \begin{Bmatrix} 20 \cdot 16\ \ mm \\ 300\ mm \\ 400\ mm \end{Bmatrix} = 300\text{ mm}$ $s_{cl,tmax}$ = 300 mm $\geq$ s = 300 mm warunek spełniony Przyjęto rozstaw strzemion równy s = 300 mm i zagęszczenie przy podporach do 150 mm.	EC 1992-1-1 9.5.3